

II-11 水蒸気ラジオメータ (気象測器)

黒岩博司* 川口則幸*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

VLBI の相関処理で得られる遅延時間から、幾何学的遅延時間を求めるためには、種々の補正が必要である⁽¹⁾。大気による伝搬遅延 (大気によって電波の伝搬時間が真空の場合より長くなること) は、この補正量の1つであり、VLBI 技術の向上に伴い、より精度良くこれを補正することが求められてきている。

大気は良く知られているように、乾燥大気と水蒸気から成り、大気による伝搬遅延もこれらの成分による遅延の和で表せる。また、遅延時間を長さに変換した Excess Path (遅延時間×光速) を用いると、大気による伝搬遅延は、乾燥大気の Excess Path L_d と水蒸気の Excess Path L_v の和になる。大気による伝搬遅延を補正するためには、 L_d 、 L_v を求めることが必要であるが、これらを直接測定することは困難である。 L_d 、 L_v を求めることについて、現在は次のように考えられている。

- ① L_d は、地上の気圧値より、天頂方向で 0.5 cm 程度の精度で求められる。従って、VLBI の精度数 cm に対しては、これは十分精度良く補正出来る。
- ② L_v は、変動が大きく、しかも水蒸気の高高度分布も大きく変動するので、地上気象データだけでは、精度良く求められない。
- ③ 従って大気による伝搬遅延の補正精度は、いかにして L_v を精度良く求めるかにかかるといえる。ラジオメータで水蒸気吸収線 (22.235GHz) 近傍の天空輝度温度を測定し、これを用いて L_v を推定すれば、天頂方向で 1 cm 以下の精度で L_v を求められる。ラジオメータは、運用、コストの面も含め、 L_v を推定する方法として、最も VLBI システムに適するものである。

水蒸気ラジオメータ (Water Vapor Radiometer, 以下 WVR と略す) は、上に述べた③の理由より開発されてきた⁽²⁾ものである。

K-3 システムの開発に当たっても、同じ観点から、WVR (K-3 WVR) を製作した。WVR の観測周波数は、WV R のデータから L_v を推定するアルゴリズムに大きく依

存する。K-3 WVR は、Wu のアルゴリズム⁽³⁾を用いることを前提にして開発したものであり、Wu の与えた最適観測周波数ペアの1つである 20/26.5 GHz で動作する 2周波ラジオメータである。

本文では、まず Excess Path 及び Wu アルゴリズムについてふれた後、K-3 WVR の機能、性能について述べる。

2. WVR よる水蒸気 Excess Path の推定

2.1 Excess Path

Excess Path L は、大気の屈折率を n 、伝搬経路を l とすると、

$$L = \int_0^{\infty} (n-1) dl$$

で表されるものであり、さらに $N=10^6(n-1)$ (refractivity) を用いると次式で与えられる。

$$L = 10^{-6} \int_0^{\infty} N dl \quad \dots\dots(1)$$

N として Bean and Dutton⁽⁴⁾ の与えた

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e^2}{T} \quad \dots\dots(2)$$

を用いると (P は気圧 [mb], e は水蒸気圧 [mb], T は温度 [K]), L は、乾燥大気の Excess Path L_d と水蒸気の Excess Path L_v の和で表せる。

$$L = L_d + L_v$$

$$\text{ただし } L_d = 77.6 \times 10^{-6} \int_0^{\infty} \frac{P}{T} dl \quad \dots\dots(3)$$

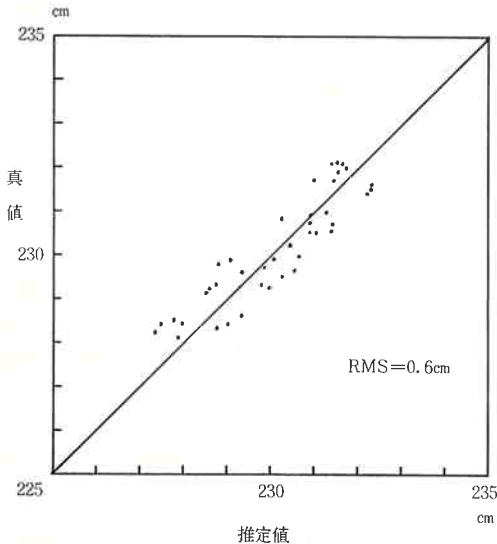
$$L_v = 3.73 \times 10^{-1} \int_0^{\infty} \frac{e^2}{T} dl \quad \dots\dots(4)$$

L_d は、乾燥大気が流体静力学的平衡にあるとしたモデルによって天頂方向では次式で推定出来るとされている⁽¹⁾。

$$L_d = A_0 P_s [\text{cm}] \quad \text{ただし } A_0 = \frac{7.76 \times 10^4 \times R}{m_d g} \\ \approx 0.23 \quad \dots\dots(5)$$

ここで P_s は地上気圧 [mb], m_d は乾燥大気の分子量 (28.966 [g]), g は重力加速度 [cm/sec²], R はガス定数 (8.3144×10^{-2} [mb·m³/mol·K]) である。第1回

* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室



データは第1表で用いたもの(40個)

第1図 乾燥空気 Excess Path の推定

に館野のラジオゾンデデータを用いて計算した天頂方向における(3)式と(5)式の比較を示すが、このデータにおいても(5)式によって十分精度良く L_v が求められることがわかる。

一方、水蒸気は、乾燥空気と異なり大気中を不均一に分布し、変動も大きいため、 L_v について(5)式のような精度の良い推定式は得られていない。例えば Bermann⁽⁵⁾ 等のモデルでは、天頂方向で1 cm より良い精度は達せられないようである。

2.5 Wu アルゴリズムによる L_v の推定

地上気象データだけでは、 L_v を精度良く推定出来ないことから、考え出されたのが WVR を用いる方法である。この原理は、WVR で測定される天空輝度温度と L_v とに強い相関があることによる。

まず(4)式は、水蒸気密度

$$\rho_v = 216.7 \frac{e}{T} [g/m^3]$$

を用いると

$$L_v = 1.72 \times 10^{-3} \int_0^\infty \frac{\rho_v^2}{T} dl \quad \dots\dots(6)$$

となる。一方天空輝度温度 T_b [K] は、次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$T_b = T_c e^{-\tau} + \int_0^\infty T_a e^{-\tau} dl \quad \dots\dots(7)$$

T_c : 宇宙背景雑音 (=2.8[K])
 $\tau = \int_0^l \alpha dl, \tau_\infty = \int_0^\infty \alpha dl$
 α : 吸収係数, $\alpha = \alpha_0 + \alpha_v + \alpha_l$ ただし添字, 0, v, l は酸素, 水蒸気, 水滴(雲)を示す

(7)式の右辺第2項は

$$\int_0^\infty \frac{T_a^2 \alpha}{\rho_v} e^{-\tau} \cdot \frac{\rho_v}{T} dl = \int_0^\infty \frac{W \rho_v}{T} dl, W = \frac{T^2 \alpha}{\rho_v} e^{-\tau}$$

と変形出来るが、重み関数 W は、水蒸気吸収線近傍の適当な周波数では高さによってあまり変化しない。このときには、(6)式と(7)式より $L_v = a + b T_b$ (a, b は定数もしくは地上気象データより計算される値) となり、 T_b によって L_v が求められることになる。ただし、ただ1周波の観測では、雲があるとき誤差が大きくなってしまふ。なぜなら雲は Excess Path にほとんど寄与しないにもかかわらず、 T_b を大きくするからである。それゆえ WVR は通常2周波の観測を行い、雲の影響を取除いている。

さて、WVR のデータから L_v を推定するアルゴリズムとしては、いくつか考え出されているが、我々は仰角 10° 以上で約 2 cm の精度を持ち、気候や地域にあまり制限されずに用いることが出来るとされる W_u のアルゴリズムを、回帰アルゴリズムとして用いることとした。

W_u のアルゴリズムを要約すると次のようになる。

①観測された天空輝度温度から次の線形化輝度温度をまず計算する。

$$T_{b \cdot i}' = T_c - (T_{eff \cdot i}' - T_c) \ln$$

$$\left(1 - \frac{T_{b \cdot i} - T_c}{T_{eff \cdot i} - T_c} \right)$$

$i=1, 2$ (2周波を示す)

$$T_{eff}: \text{平均温度} = (1 + 0.009m) T_{eff}'$$

$$m = \frac{1}{\sin(\text{仰角})}$$

$$T_{eff}' = 0.95 T_s(20\text{GHz}), 0.946 T_s(26.5\text{GHz})$$

ただし T_s は地上気温

②地上気象データより、次の重み関数 W_m' を計算する。

$$W_m' = \frac{T_s(T_s - T_c)}{\rho_v} \left(\frac{\alpha_{v \cdot 1}}{f_1^2} - \frac{\alpha_{v \cdot 2}}{f_2^2} \right) \quad \dots\dots(8)$$

$\rho_v, \alpha_{v \cdot 1}, \alpha_{v \cdot 2}$ は地上における値

f_1, f_2 : 観測周波数

③次式で L_v を求める。

$$L_v = \frac{1}{W_m'} (b_0 + b_1 T_{b \cdot 1}' + b_2 T_{b \cdot 2}') \quad \dots\dots(9)$$

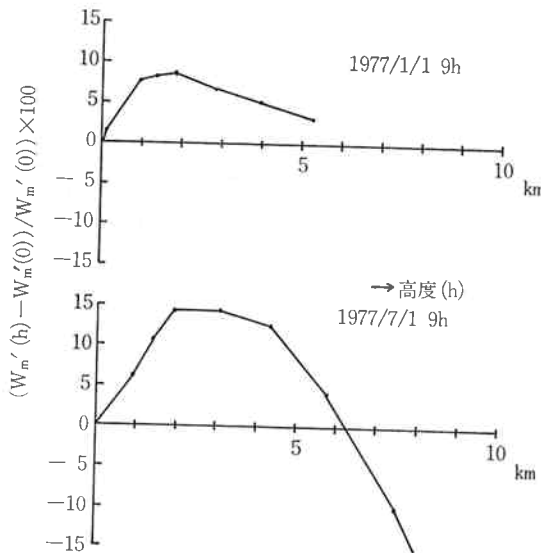
ただし、 b_0, b_1, b_2 はラジオゾンデを用いて(6)式で計算される L_v と(9)式で計算される L_v を最小2乗 Fitting した時に得られる係数。但し、雲の影響を除くため、この Fitting において、 b_1 と b_2 には次の拘束をつける。

$$\frac{b_1}{b_2} = - \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$$

第1表 20/26.5GHz での Wu 係数及び Lv 推定分散 (館野ラジオゾンデデータ, 1977年 各月10個)

	Wu 係数	1月	4月	7月	10月	トータル
1月	$b_0 = -0.615$ $b_1 = 0.405$ $b_2 = -0.231$	0.07	0.08	0.58	0.57	0.41
4月	$b_0 = -0.600$ $b_1 = 0.405$ $b_2 = -0.231$	0.10	0.06	0.60	0.59	0.43
7月	$b_0 = -0.828$ $b_1 = 0.409$ $b_2 = -0.233$	0.92	0.87	0.20	0.63	0.71
10月	$b_0 = -0.768$ $b_1 = 0.413$ $b_2 = -0.325$	0.56	0.52	0.57	0.48	0.54

単位 cm



第2図 重み関数 (W_m') の高度変化

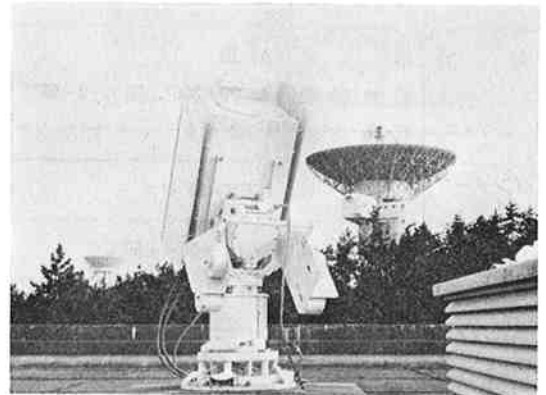
第1表に、K-3 WVR の観測周波数である 20/26.5 GHz ペアについて、館野のラジオゾンデデータより求めた Wu 係数 b_0 , b_1 , b_2 を示す。Wu によれば係数は不変のようであるが、表1の係数は Wu の与えたもの⁽³⁾と若干異なる。これはやはり、日本の気候風土(高温多湿)によるものと思われる。年間を通じて求めた係数を用いれば、どの月でも分散は小さいが、例えば7月のデータで求めた Wu 係数をそのまま冬季に使用する

ことは危険なことが表1よりわかる。このことは、第2図に示すように夏季では重み関数 W_m' の高さ変化が大きく、夏季のデータで求めた係数はあまり一般性を持たないためと考えられる。従って Wu 係数としては、年間の平均値を用いるべきであり、また夏季では、夏季のラジオゾンデ値より求めた Wu 係数を用いた方が良いものと思われる。

3. K-3 型水蒸気ラジオメータ

3.1 概説

K-3型水蒸気ラジオメータ(K-3 WVR)は、アンテナと受信系を一体とした受信部、データ処理、制御、ホストコンピュータとのインターフェイスを行う指示部、アンテナを所定の方向に向けるための駆動部、地上気象データを測定する気象測器より構成されている。第3図は受信部の外観である。VLBI では仰角 10° くらいまでの観測が行われるので、受信部は 26 mφ アンテナに近く、建物や樹木が観測方向にかからない、本庁舎屋上に設置してある。



第3図 K-3 WVR 受信部外観

第2表に K-3 WVR の主要性能を記す。

3.2 アンテナ

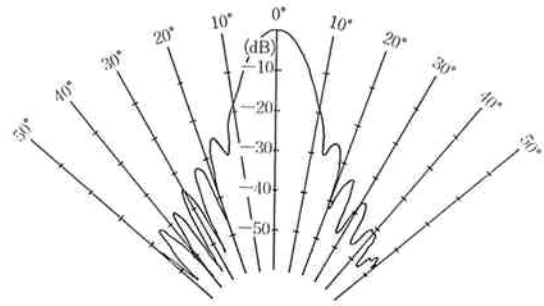
WVR は、天空輝度温度の絶対値を測定しなければならないため、ビームは出来る限り狭い方が良い。すなわち、視線方向を $\theta=0$ とする極座標を用いると、アンテナで受信される温度 T_a は

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (T_b(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad \dots\dots(10)$$

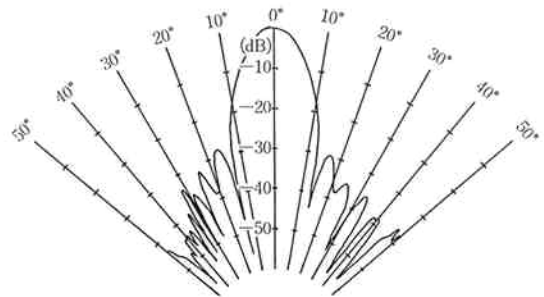
であるのに対し (T_b : 天空輝度温度, G : アンテナ利得), 求めたい天空輝度温度は $T_b(0,0)$ ゆえ、 G の広がりにより、 T_a と $T_b(0,0)$ の差が大きくなるからである。ビームをせまくするには、アンテナ径を大きくとれ

第2表 K-3 WVR 主要性能

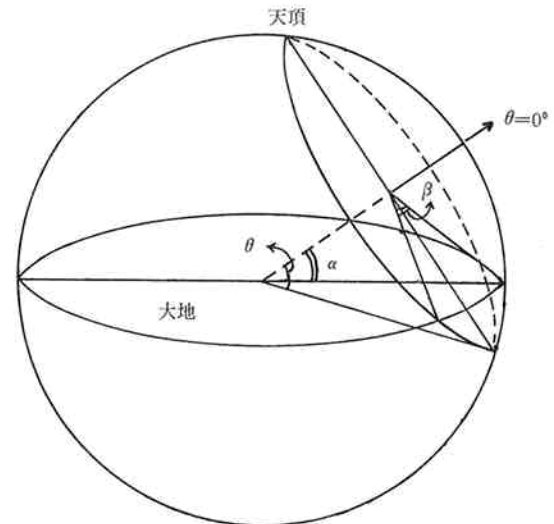
区分	項目	性能
測定周波数		20GHz±100MHz, 26.5GHz±100MHz
アンテナ	形式	誘電体装荷円錐ホーン
	利得	26.5dB (20MHz), 26.3dB (26.5GHz)
	ビーム幅	約 7.5° (2周波で等しい)
	サイドローブレベル	-25dB 以下
	背面利得	-15dBi 以下
	偏波	直線
ラジオメータ	方式	パルス幅変調 バランス型ディッケ
	IF帯域	10~110MHz
	NF	8 dB 以下
	ディッケ切替周波数	415Hz
	積分時間	0.2, 1, 3, 5, 10秒(ソフト処理)
	最小検出感度	0.2K以下 (3秒積分)
	測定範囲	最小30K以下, 最大300K以上
	校正器	約 300Kダミーロード
架台	形式	Az-EI
	駆動範囲	Az: 0±300°, EI: -2~95°
	駆動速度	1°/秒 以上
インターフェイス		IEEE-488 バス
気象計	測定範囲	気温 -50~+50°C
		気圧 930~1050mb
	精度	湿度 15~99.9%
		気温 ±0.5°C 以下, 気圧 ±0.6mb 以下
		温度 ±5% 以下
インターフェイス		IEEE-488 バス



第4図(a) 20 GHz アンテナパターン (E面)



第4図(b) 26.5 GHz アンテナパターン (E面)



第5図 大地雑音の計算に用いた座標

ば良いが, K-3 WVR の受信部は将来 26 mφ アンテナ副反射鏡背面に取付けることにしているため, 誤差が許容される範囲にあって出来るだけ小型なアンテナが望ましい。種々の検討の結果, 小型, 軽量であり, サイドローブや背面利得の小さい, 利得約 26 dB の誘電体装荷円錐ホーンをアンテナとして用いることにした。第4図に受信部に実装した状態でのパターンを示す。ビーム幅は2周波で一致し, 約 7.5° である。WVR では, 2周波のアンテナのビーム幅は等しいことが要求されるが, 製作したアンテナは十分この条件を満たしている。

ビームの広がりによる誤差は, ①大地からひろう雑音温度, ②ビームの平滑化による誤差, に分けて考えるこ

とが出来る。①については, アンテナ仰角を α とすると第5図より次式で計算出来る。

$$T_1 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\beta}^{\beta} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} T_{\theta} G(\theta) \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$+ \frac{1}{4\rho} \int_0^{2\pi} \int_{\pi-\alpha}^{\alpha} T_{\theta} C(\theta) \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right)$$

ここで T_g は大地の温度であり、パターンは軸対称とした。大地の影響は仰角に依存し、観測データに系統的誤差を与える。そのため、我々は仰角 $90^\circ \sim 10^\circ$ の範囲において、 T_1 の変化が 1 K 以下であることを一つの条件とした。今回製作したアンテナの設計値によれば、この変化は 0.8 K 以下と計算されており、若干設計時のパターンと異なるけれども、製作したアンテナはこの条件を十分満足するものと考えられる。また②の誤差については、天空輝度温度 T_b を

$$T_b = T_c e^{-\tau m} + T_{eff} (1 - e^{-\tau m}) \doteq T_{eff} \tau m \quad \dots\dots(11)$$

$$m = \frac{1}{\cos\theta \sin\alpha + \sin\theta \cos\alpha \cos\varphi}$$

と近似し、ビーム中心の $\pm\gamma^\circ$ の範囲で T_b を平均すると、 T_b の平均値 \bar{T}_b が次式で表わされるので、

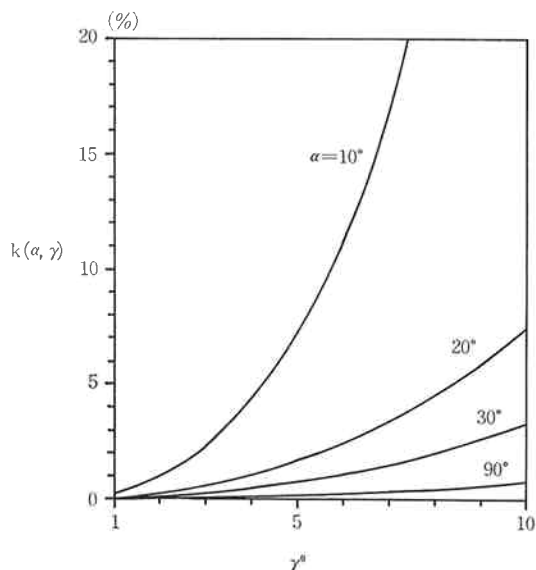
$$\begin{aligned} \bar{T}_b &= \frac{1}{2\pi(1-\cos\gamma)} \int_0^{2\pi} \int_0^\gamma T_b \sin\theta d\theta \\ &= \frac{T_{eff}\tau}{\sin\alpha} k(\alpha, \gamma) \end{aligned}$$

ただし

$$k(\alpha, \gamma) = \frac{\sin\alpha}{1-\cos\gamma} \ln \left| \frac{1+\sin\alpha}{\cos\gamma + \sqrt{\sin^2\alpha - \sin^2\gamma}} \right|$$

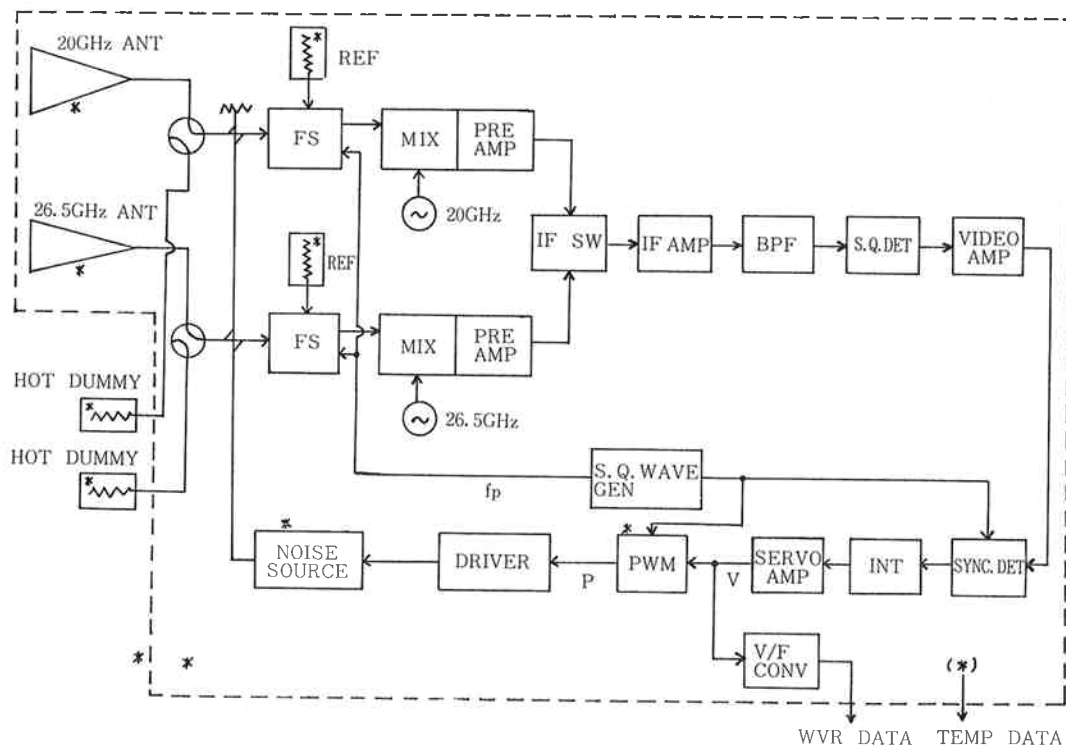
$k(\alpha, \gamma)$ で評価出来ると考えられる ($T_{eff}\tau/\sin\alpha$ が真値ゆえ)。第 6 図に $k(\alpha, \gamma)$ の計算例を示すが、本アンテナのビーム半値幅約 4° を γ とすると、 \bar{T}_b は仰角 10° で

4%程度視線方向の輝度温度より大きくなる。ビーム中心以外のところから受ける雑音温度の仰角依存性を無視すると $k(\alpha, \gamma)$ の補正を観測仰角に対し加えることによ



α ; 仰角, γ ; ビーム幅
 $k(\alpha, \gamma)$ はビーム幅内での平均輝度温度とビーム中心方向の輝度温度の比

第 6 図 ビーム幅内での輝度温度比 $k(\alpha, \gamma)$



*印は温度モニタ用センサ位置を示す
第 7 図 K-3 WVR 受信部ブロック図

WVR DATA TEMP DATA

り、②項の誤差は十分小さくなると思われる。

なお、耐候性を考慮し、アンテナは受信部内に組入れてあり、アンテナ前面をテフロン板でおおう構成になっている。

3.3 受信部

第7図に受信部のブロック図を示す。ラジオメータの方式は、パルス幅変調のバランス型ディック方式である。図で、フェライトスイッチ (FS) 入力端において、レファレンスロード (REF) の温度を T_r 、アンテナ側の温度を T_a 、カプラーを介して注入されるノイズソースからの温度を T_n 、そのパルス幅を ρ とすると、レファレンス側とアンテナ側がバランスした時には次式が成立つ。

$$T_a = T_r - 2f_p T_n \rho \quad \dots\dots(12)$$

f_p : ディックくり返し周波数

この ρ は、パルス幅変調回路 (PWM) にかかる制御電圧 V と比例関係にあるので、結局 V より T_a が求められる。本 WVR では、サーボアンプ (SERVO AMP) の出力であるこの V を V/F コンバータで周波数情報に変換し出力している。これは、受信部と次に述べる指示部の間のケーブルでの雑音混入をさけるためである。

バランス型ディックゆえミキサプリアンプ、IF アンプ等の利得変動は無視し得るが、(12)式よりわかるように f_p 、 T_n 、 ρ 、 T_r の変動は誤差を与えるため無視し得ない。それゆえ、受信部全体を ± 1 K 以内で温度制御し、各部の安定化を図っている。

なお図7に示されるように、ノイズソースおよび IF 以降は、2周波で共通になっている。これは、回路を共通にして、装置全体を簡素化することをねらったものである。但しこのため、2周波同時の観測は行えず、1秒ごとに IF スイッチ (IF SW) を切替え、20 GHz、26.5 GHz を交互に測定している。

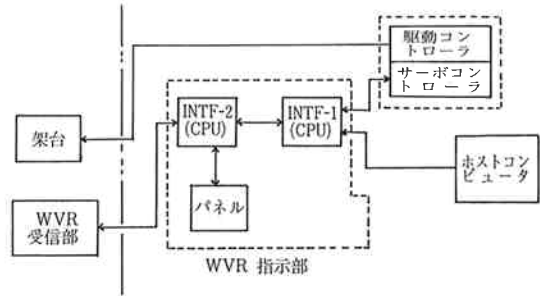
本部は、重さ約 60 kg、大きさは 39cm×45cm×100 cm であり、これはそのまま 26 mφ アンテナ副反射鏡背面に取付けることが出来、当初目標とした小型、軽量化は十分達し得たと考える。

3.4 指示部

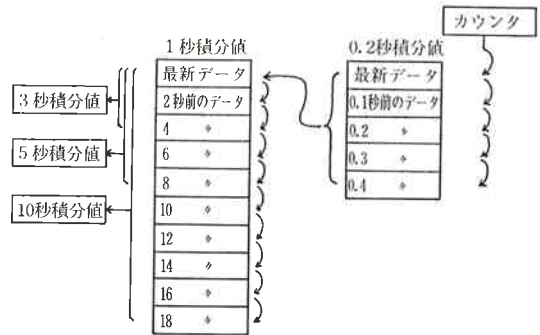
指示部は、受信部より送られてくる WVR データ (アンテナ雑音温度に比例する周波数値) および合計10点のモニタ温度データを処理して、輝度温度、モニタ温度を表示するとともにホストコンピュータへこれらのデータを出力する。またリモート制御により受信部の校正用スイッチ (第7図の CAL SW) を切替えるとともにそのステータスを収集、表示する。指示部の操作はマニュアルのほか、IEEE-488 バスを介し K-3 システムのプロトコル形式 (本特集号 II-12 参照) に従ったフォーマッ

トでコンピュータからも行うことが出来る。

第8図は指示部の系統図である。インターフェイス2 (INTF-2) の CPU は、WVR の制御、データ収集、およびデータの処理を行い、インターフェイス1 (INTF-1) の CPU は、IEEE-488 バスを介したホストコンピュータとのインタフェイスおよび受信部の架台を駆動制御する。また架台コントローラとの角度データの送受を行う。



第8図 指示部系統図



周波数の切替えを1秒ごとに行っているため1秒積分値は2秒ごとに作られる。

第9図 ソフトによる積分

指示部のデータ処理には、積分処理および校正演算がある。積分処理は、受信部より送られてくる周波数をカウンタで測定した後、第9図のようにして1秒、3秒、5秒、10秒積分値を求めるものである。第9図でカウンタで測定した値は、受信部のループ内の積分器 (0.1秒積分) と V/F コンバータ (0.1秒積分) によって0.2秒積分された値である。これを5個平均し1秒積分値を得る。3秒以上の積分データは、1秒積分値を移動平均した値であり、1秒ごとに算出される。

校正演算は上記の積分データに対して行われる。まずフェラントスイッチ入力端でのアンテナ雑音温度 T_a が(12)式に従って計算される。この時の校正係数は、コンピュータで容易に変更出来るようになっており、さらにレファレンス温度にはモニタ温度値を使用し、レファレン

ス温度の変化による誤差を無くすようにしている。次にアンテナ及び給電部の損失 $1/L$ を用いて、次式によってアンテナ入力端のアンテナ雑音温度 T_a を計算する。

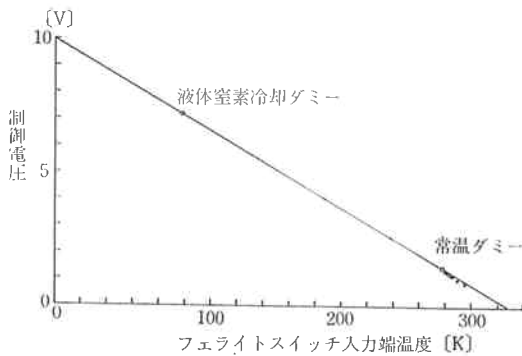
$$T_a = LT_d - (L-1)T_{ovn} \quad \dots\dots(13)$$

T_{ovn} : 受信部温度

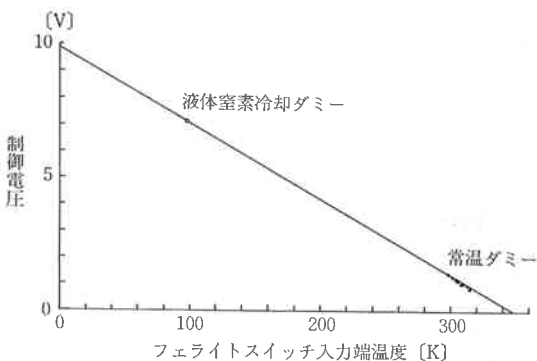
L の値は、20 GHz で 0.355 dB, 26.5 GHz で 0.364 dB である。(アンテナ前面のテフロンの損失も含む)。

通常は(13)式をもってアンテナ雑音温度としているが、場合によっては 3.2 で述べたアンテナパターンの補正が必要となるかもしれない。現在この補正は指示部内で行っていないが、今後検討すべき課題の 1 つである。

なお、生データから T_a を求める校正係数は、第10図に示す校正直線より求められる。図10の直線は、アンテナ前面を電波吸収体でおおった時の PWM 制御電圧と、吸収体を液体窒素で冷却した時の制御電圧から求めたものである(入力温度はフェライトスイッチ入力端に換算してある)。



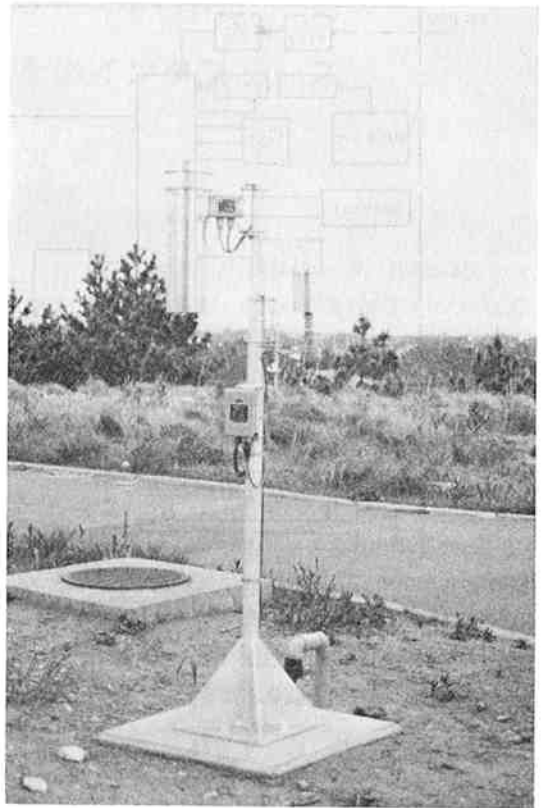
第10図(a) 20 GHz 校正直線



第10図(b) 26.5 GHz 校正直線

3.5 駆動部

駆動部は Az-E1 タイプの架台および架台のコントローラから構成されており、手動またはホストコンピュータによって全天駆動が可能である。構造は架台のコントローラのトルクシンクロ発振器と架台内のトルクシンク



第11図 温度および露点計センサ部外観

ロ受信機を 1 対 1 に対応させた簡単なものである。

3.6 気象測器

本器は、地上気象データ(温度、湿度、気圧)を測定するものであり、これらの値より乾燥空気の Excess Path, Wu アルゴリズムの重み関数 W_m' が計算される。第11図に温度計および湿度計の外観を第12図にその系統図を示す。なお気圧計は実験室内の気象測器本体内部に格納されている。

①温度計

白金測温抵抗体をセンサとして、これをブリッジの 1 辺に入れ、温度による抵抗変化を検出する。センサには 5 ~ 6 m/s の強制通風がなされている。

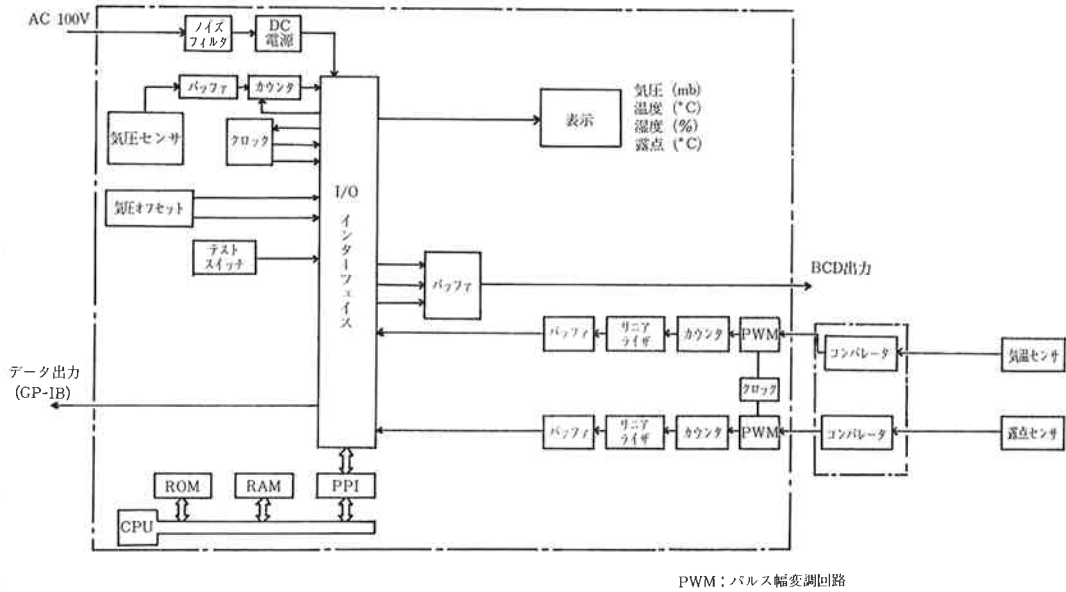
②露点計

塩化リチウムの吸湿電動性を利用したもので露点温度によってブリッジの 1 辺に入れられたニッケル測温抵抗体の抵抗変化を検出する。自然通風を行っている。

③気圧計

圧力変化に応じて、2 枚の水晶振動子の発振周波数の差が変化することを利用したものである。

気象計の性能は、第 2 表に示すように、気温 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以下、気圧 $\pm 0.6\text{mb}$ 以下、湿度 $\pm 5\%$ 以下である。本



第12図 気象測器系統図

装置も WVR と同様に、IEEE-488バスによってホストコンピュータにデータを収集出来るものである。

4. む す び

K-3 VLBI システムを構成する1装置として、大気中の水蒸気による Excess Path を補正する目的で、K-3型水蒸気ラジオメータ (WVR) を開発した。K-3 WVR は、小型であり、またバランス型ディック方式を採用し、アンテナと受信部を一体として恒温化するなど、安定に動作するよう配慮されている。さらに全てのデータ収集、制御をIEEE-488バスでコンピュータより行うことが出来、運用が容易なものとなっている。

WVR を用い、水蒸気の Excess Path を高精度に求める試みは、既に米国の MK-III VLBI グループによってなされているが、現時点でもその手法は確立しているとは言難い。今回開発した K-3 WVR は、観測周波数としては 20/26.5 GHz を採用し、*Wu* のアルゴリズムを用い、水蒸気の Excess Path を推定するものである。我々は、他の水蒸気 Excess Path 推定アルゴリズムの検討も必要であると考えているが、当面この *Wu* のアルゴリズムによって水蒸気 Excess Path を高精度に推定することを確立したいと考えている。このためには、真の天空輝度を WVR でいかに精度良く測るかが重要であり、ラジオゾンデとの比較等と合わせ、検討しなければならない課題である。

現在 VLBI システムでは、Marini モデル (本特集号 IV-4 参照) によって大気中の Excess Path を補正することが多いが、本文中で述べたように WVR を用い

ることの利点は明らかである。今後実際の VLBI 実験に使用して、WVR の有効性を確かめていきたい。

謝 辞

本水蒸気ラジオメータの開発に当っては、衛星計測部尾嶋主任研に多大な御助力をいただきました。ここに謝意を表します。また VLBI 本部およびセンタの関係各位の御援助に深謝します。

参 考 文 献

- (1) 河野; "VLBI の原理", 電波研季, 24, 130, Sept. 1978.
- (2) Moran, J. M., and Penfield, H.; "Test and Evaluation of Water Vapor Radiometer and Determination of their Capability to Measure Tropospheric Propagation Path Length", SIO, GSFC.
- (3) Wu, S. C.; "Optimum Frequencies of a Passive Microwave Radiometer for Tropospheric Path-Length Correction", IEEE Trans, Vol AP-27, No. 2, March 1979.
- (4) Bean, B. R., and Dutton, E. J.; "Radio Meteorology", Dover Publ., New York, 1968.
- (5) Berman, A. L.; JPL Tech. Report 32-1602.
- (6) Kraus, J. D.; "Radio Astronomy", McGraw-Hill Book Co., New York.